



# **MSP430- JA AVR-MIKROKONTROLLERIEN I/O- RAKENTEET**

Juuso Tapaninen

Ohjaaja: Timo Rahkonen

**SÄHKÖTEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA**

**2019**

**Tapaninen J. V. V. (2019) MSP430- JA AVR-MIKROKONTROLLERIEN I/O-RAKENTEET.** Oulun yliopisto, Elektroniikan ja tietoliikennetekniikan tutkinto-ohjelma. Kandidaatintyö, 32 s

## **TIIVISTELMÄ**

**Tässä tutkimuksessa perehdytään MSP430- ja AVR-mikrokontrollereiden I/O-toteutuksiin ja tutkitaan niiden käyttäytymistä. Toteutuksiin perehtyminen sisältää digitaalisen rakenteen läpikäymisen vaihe vaiheelta. Käyttäytymistä tutkitaan mittaamalla muuttuva-arvoisen pinnin nousu- ja laskuajat, minkä lisäksi tutkimuksessa mitataan pinnin resistanssit usealla käyttöjännitteellä.**

**Avainsanat:** AVR, MSP430, I/O, Microchip, Atmel, Texas Instruments, Input/Output

**Tapaninen J. V. V. (2019) The I/O structure of MSP430 and AVR microcontrollers.** University of Oulu, Degree Program in Electrical Engineering, Bachelor's thesis, 32 p.

## **ABSTRACT**

**This research is about exploring the implementation and behaviour of the I/O structure of MSP430 and AVR microcontrollers. The implementation part includes reviewing the digital design step by step. Behaviour is reviewed by measuring the rise and fall times of a pin that is changing its state. In addition, pin resistances are measured using several operating voltages.**

**Key words: AVR, MSP430, I/O, Microchip, Atmel, Texas Instruments, Input/Output**

## SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ .....	2
ABSTRACT .....	3
SISÄLLYS .....	4
ALKULAUSE .....	5
1. JOHDANTO .....	6
2. TEKNIIKAN NYKYTILA JA TUTKITTAVIEN PIIRIEN PERUSTEET ..	7
3. RAKENTEIDEN ANALYYSI .....	9
3.1. AVR-mikrokontrollerin I/O:n digitaalirakenne .....	9
3.2. MSP430-mikrokontrollerin I/O:n digitaalirakenne .....	13
4. MITTAUKSET .....	17
4.1. AVR:n I/O:n nousu- ja laskuajat .....	17
4.2. MSP430:n I/O:n nousu- ja laskuajat .....	18
4.3. AVR:n I/O:n resistanssimittaukset .....	19
4.4. MSP430:n I/O:n resistanssimittaukset .....	22
5. POHDINTA .....	25
6. YHTEENVETO .....	26
7. LÄHTEET .....	27
8. LIITTEET .....	28

## ALKULAUSE

Tämä kandidaatintyö on tehty osana kandidaatintutkintoa tieto- ja sähkötekniikan tiedekunnassa Oulussa keväällä 2019. Haluan kiittää ohjaajaani Timo Rahkosta palautteesta ja ohjeistuksesta sekä äitiäni Tarja Tapanista oikolukemisesta. Kiitoksen ansaitsee myös lähipiirini, jota ilman oikean tien ja aikataulujen löytäminen olisi ollut hankalaa.

Oulussa, huhtikuussa 2019

Juuso Tapaninen

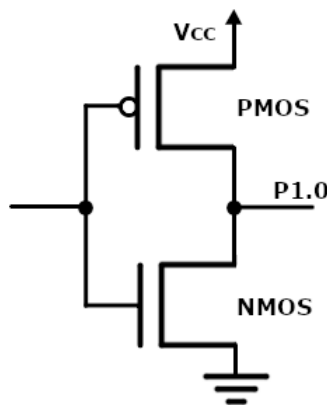
## 1. Johdanto

Työn tarkoituksena on selvittää Texas Instrumentsin MSP430-sarjan ja Microchipin (ennen Atmel) AVR-mikrokontrollerien I/O-rakenteita ja verrata niitä keskenään. Tulo- ja lähtöportit (I/O-portit) ovat mikrokontrollerin tapa kommunikoida ulkomaailman kanssa, ja niitä varten kontrollerista on varattu tietty määrä pinnejä. Ymmärtääkseen pinnien tarkan käyttäytymisen ja mahdolliset ongelmat on niiden rakenne tunnettava, vaikka porttien avainominaisuudet ja raja-arvot onkin usein, kuten tässä tilanteessa, annettu valmistajan dokumenteissa valmiina. Suuri määrä erilaisia käyttökohteita mutkistaa tilannetta ja kokonaisvaltainen ymmärrys on täten suotavaa. Kummankin valmistajan mikrokontrollereiden käyttökohteet ovat hyvin samankaltaisia, joten pinnien logiikan toteutus lienee varsin samankaltainen ja samantyyppisistä komponenteista koottu. Valmistajat ovat kuitenkin mitä suurimmalla todennäköisyydellä joidenkin ominaisuuksien kohdalla päätyneet erilaisiin ratkaisuihin ominaisuuksien implementoinnissa.

## 2. Tekniikan nykytila ja tutkittavien piirien perusteet

Kyseisten mikrokontrollereiden kohdalla I/O-portit ovat pääasiassa digitaalisia lähtöjä tai tuloja, mutta osalla niistä on myös lisäominaisuuksia kuten ADC-, keskeytys- tai I<sup>2</sup>C-toiminnallisuus. Kummatkin sisältävät ohjelmoitavan Flash-muistin, johon ajettavan ohjelman avulla pinnien ohjausrekistereitä hallitaan.

Molemmat kontrolleriperheet perustuvat CMOS-teknologiaan, mikä tarkoittaa sitä, että portti koostuu PMOS- tai NMOS-transistoreista. I/O-pinnan tapauksessa looginen yksi tulee PMOS-transistorin kautta ja pinni kytketään maihin NMOS:in kautta. Kummankin hilalle tulee sama ohjaussignaali, joten käyttöjännite ei voi oikosulkeutua maihin molempien transistorien kautta samaan aikaan. Kuvassa 1 on esitetty CMOS-invertteri, jota voidaan käyttää havainnollistamaan pinnan analogista käyttäytymistä.



Kuva 1. CMOS-invertteri (mukaillen [1], Figure 7.9)

MOSFET-transistorin yleinen virtayhtälö on tunnetusti seuraavaa muotoa:

$$I = \frac{1}{2} * \mu C_{ox} \frac{W}{L} [2 * (V_{SG} - |V_T|)V_{SD} - V_{SD}^2] \quad (1)$$

Transistorit eivät siis toimi täydellisenä kytkimenä, vaan niissä kulkeva virta riippuu transistorin ominaisuuksista ja transistorin napojen jännitteistä. Mittaukset keskittyvät arvioimaan tällä teknologialla toteutettujen puskureiden ominaisuuksia.

Käyttötarkoituksesta ja varsinkin köykäisten vaatimusten vuoksi kontrollerit lienee valmistettu suurella viivanleveydellä, mutta kummastakaan ei löytynyt virallista viivanleveyttä kohtuullisella vaivalla. Molemmat tuoteperheet ovat huomattavan vanhoja, ja molemmista löytyy internetsivut vuodelta 2003 Internet Archive -palvelusta.

Kehitysalustat kuten Arduino tai Launchpad ovat tehneet kummastakin kontrollerista helposti lähestyttävän ja harrastelijaystävällisen. Ohjelmointiympäristöt kuten Arduino IDE ja Energia ovat tiukasti harrastelijaprojekteissa kiinni. Tämänkaltaiseen tarkoitukseen näiden kahden kontrollerin suojaominaisuudet ja toleranssit ovat omiaan. Kumpaakin voidaan kuitenkin käyttää jonkin verran edistyneempiin projekteihin, joissa voidaan vaatia nopeahkoa tiedonsiirtoa. Tämä asettaa I/O-rakenteille haasteita, joiden ratkaisemiseksi on ehkä jouduttu tekemään kompromisseja.

Atmega328P tarjoaa seuraavat (taulukossa 1 ja 2 niputetut) ominaisuudet I/O-pinnien kautta. Kalliimmissa ja monimutkaisemmissa malleissa voi olla enemmän toiminnallisuuksia.

I <sup>2</sup> C	I <sup>2</sup> C-väylä
SPI	SPI-väylä
PWM	Pulssinleveysmodulaatiolähtö
Keskeytykset	Ulkoisen keskeytyssignaalin hallinta
Analogiatoiminnallisuus	Analoginen tulo tai lähtö
Digitaalinen toiminnallisuus	Digitaalinen tulo tai lähtö
UART	UART-väylä
Komparaattori	ADC:tä nopeampi jännitteiden vertailu

Taulukko 1. Atmega328P:n I/O:n ominaisuudet [2]

MSP430G2553 tarjoaa vastaavasti alla olevat ominaisuudet.

I <sup>2</sup> C	I <sup>2</sup> C-väylä
SPI	SPI-väylä
Kapasitiivinen havainnointi	Kyky havaita mm. kosketus kapasitiivisesti
Keskeytykset	Ulkoisen keskeytyssignaalin hallinta
Analogiatoiminnallisuus	Analoginen tulo tai lähtö
Digitaalinen toiminnallisuus	Digitaalinen tulo tai lähtö
UART	UART-väylä
Komparaattori	ADC:tä nopeampi jännitteiden vertailu

Taulukko 2. MSP430:n I/O:n ominaisuudet [6]

Huomataan perusominaisuuksien olevan melko yhtäläiset kummankin tarjotessa tavanomaisimmat väylät sekä digitaalisen ja analogisen toiminnallisuuden.

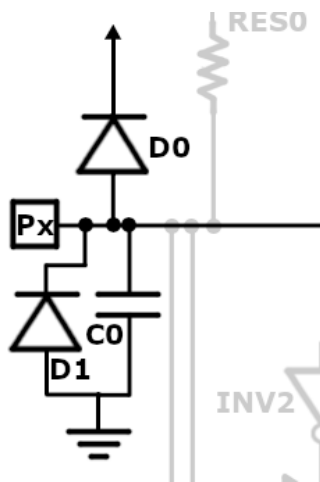


### 3. Rakenteiden analyysi

#### 3.1 AVR-mikrokontrollerin I/O:n digitaalirakenne

AVR:n I/O-porttia ohjataan yhteensä kolmella, useimmiten 8-bittisellä, rekisterillä, joista jokaisesta on varattu yksi bitti yhdelle pinnille, joten näillä kolmella rekisterillä pystyy ohjaamaan kahdeksaa eri I/O-pinniä. Rekisterien määrä vaihtelee mallien välillä käytössä olevien I/O-porttien mukaan. ATtiny25-mikrokontrollerissa on yksi 6-bittinen rekisteri kutakin tyyppiä [2] eli kolme rekisteriä yhteensä. ATmega2560:ssä rekistereitä on puolestaan  $11 * 3$  kappaletta. [3] Piirikaavioiden tutkimuksessa käytettiin Atmega328P-mallia, joka on yksi suosituimmista ja tunnetuimmista AVR-tuoteperheen mikrokontrollereista Arduino Unon ansiosta.

Jokainen I/O-portti on suojattu kahdella suojadiodilla (kuva 2), jotka estävät vahinkojen syntymisen liian suurella tai negatiivisella jännitteellä suhteessa maatasoon ja suojaavat myös ESD-häiriöiltä.



Kuva 2. Atmega328P:n suojadiodit ja pinnin kapasitanssin esitys (mukaillen lähdettä [2], Figure 14-1.)

Jokaisen pinnin tulokapasitanssi on 10 pikofaradia, mikä pitää ottaa varsinkin korkean taajuuden sovelluksien suunnittelussa huomioon. Pinniin saa syöttää maksimissaan puoli voltia käyttöjännitettä suurempaa jännitettä tai minimissään puoli voltia maatasoon verrattuna negatiivista jännitettä. [2]

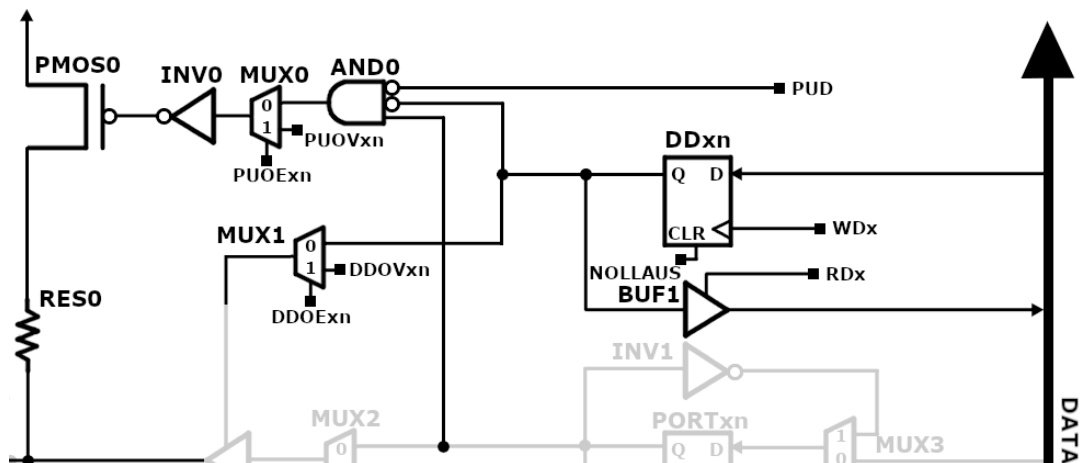
AVR-mikrokontrollereissa on useampia erilaista I/O:n toteutusta, mutta ne kaikki pohjautuvat samaan perusrakenteeseen. Kompleksisuutta tuo lisää erilaiset lisätoiminnot kuten ADC. Suojadiodien jälkeen alkaa varsinainen I/O-portin ohjauslogiikka. Taulukossa 3 on listattu kaikki portin ohjaamiseen tarkoitetut signaalit. [2]

Ohjaussignaali	Ominaisuudet
PUD	Poistaa passiivisen ylösvedon käytöstä, signaali on yhteinen kaikille porteille
SLEEP	Lepotilan ohjaussignaali, yhteinen kaikille porteille
clk <sub>I/O</sub>	Tahdistimen kello, yhteinen kaikille porteille
WDx	DDRx:n kirjoituksen ohjaus
RDx	DDRx:n lukemisen ohjaus

WR <sub>x</sub>	PORT <sub>x</sub> :n kirjoituksen ohjaus
RR <sub>x</sub>	PORT <sub>x</sub> :n lukemisen ohjaus
RP <sub>x</sub>	PIN <sub>x</sub> :n lukemisen ohjaus
WP <sub>x</sub>	PIN <sub>x</sub> :n kirjoittamisen ohjaus
PUOEx <sub>n</sub>	Ylösvetovastuksen korvaava ohjaus
PUOVx <sub>n</sub>	Ylösvetovastuksen arvo korvaavalla ohjauksella
DDOEx <sub>n</sub>	Pinnin suunnan korvaava ohjaus
DDOVx <sub>n</sub>	Pinnin suunnan arvo korvaavalla ohjauksella
PVOEx <sub>n</sub>	Pinnin arvon korvaava ohjaus
PVOVx <sub>n</sub>	Pinnin arvo korvaavalla ohjauksella
DIEOEx <sub>n</sub>	Digitaalisen tulon korvaava ohjaus
DIEOVx <sub>n</sub>	Digitaalisen tulon arvo korvaavalla ohjauksella

Taulukko 3. AVR-kontrollerin ohjaussignaalit (mukaillen lähdettä [2] , Figure 14-5.)

PMOS0:aa käytetään yhdistämään pinni ylösvetovastuksen kautta käyttöjännitteeseen (kuva 3). Ohjaussignaali tälle saadaan AND0-portista ja invertoidaan invertterillä INV0. AND0:n lähdön tulee siis olla looginen yksi, jos halutaan PMOS0:n johtavan. AND0:n ja INV0:n välissä on MUX0, jolla pystytään korvaamaan AND0:lta tuleva signaali ulkoisella ohjauksella, jos pinnissä on sitä tarvitsevia lisäominaisuuksia.

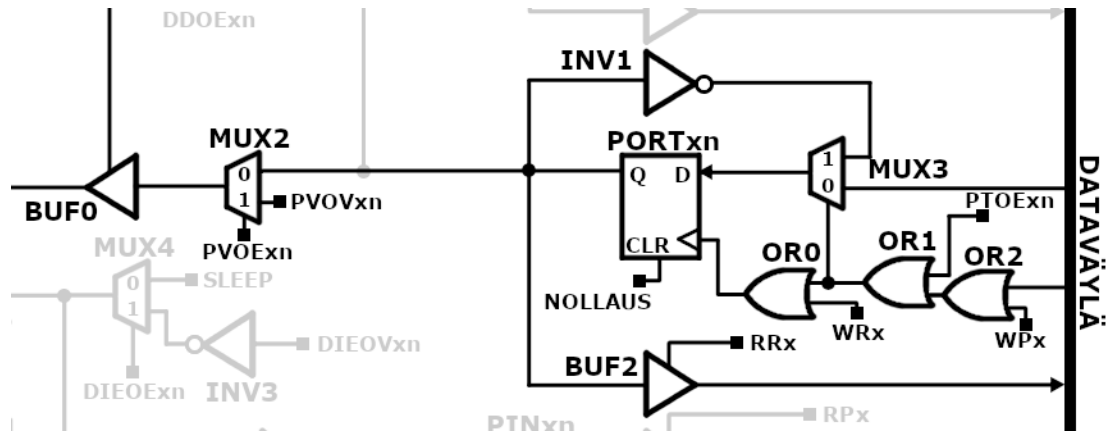


Kuva 3. AVR:n ylösvedon ja suunnan ohjaus (mukaillen lähdettä [2], Figure 14-5.)

AND0 antaa arvon yksi silloin, kun ohjaussignaalien PUD (ylösvedon poistaminen on pois käytöstä) ja DD<sub>xn</sub> (portin on oltava tulotilassa) ovat loogisia nollia. Lisäksi PORT<sub>xn</sub>-kiikun pitää olla looginen yksi. BUF1 palauttaa DD<sub>xn</sub>:n arvon dataväylään, jos RD<sub>x</sub> on ylhäällä. WD<sub>x</sub> on kytketty kiikun kelloon, mikä ajaa tässä tapauksessa uuden arvon kiikkuun. Multiplekserillä MUX1 voi vaikuttaa pinnin suuntaan tapauksissa, joissa ylös veto ei ole käytössä.

Kolmitilainen puskuri BUF0 päättää DD<sub>xn</sub>-kiikun arvon perusteella, kytetäänkö PORT<sub>xn</sub>-kiikun lähtö pinniin P<sub>xn</sub> vai jätetäänkö lähtö suuri-impedanssiseksi (kuva 4). Tässäkin kohtaa ”ylimääräisellä” multiplekserillä MUX2 pystyy ottamaan manuaalisesti ohjat ja korvaamaan PORT<sub>xn</sub>:n arvon. Lähtötilassa pinni yhdistetään käyttöjännitteeseen tai maihin kyseisen puskurin sisältämien transistoreiden kautta. PORT<sub>xn</sub> näkyy I/O-pinnin lähdössä, jos I/O-pinni on määritetty lähtötilaan. Mikäli

pinni on tulotilassa, BUF0 on korkeaimpedanssisessa tilassa vaikuttamatta käytännössä piirin toimintaan.



Kuva 4. AVR:n pinnin arvon ohjaus (mukaillen lähdettä [2], Figure 14-5.)

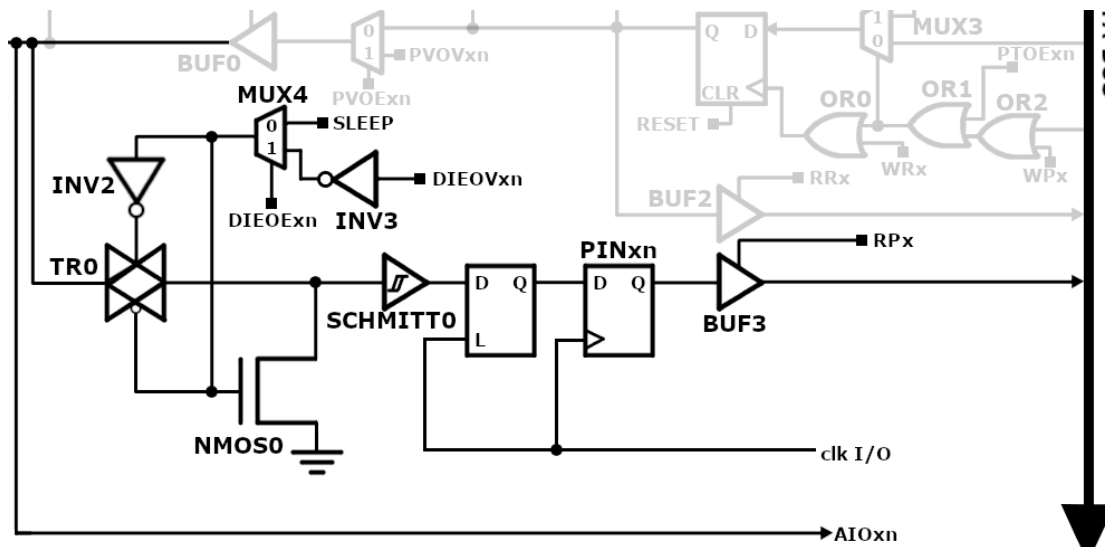
Käskey WPx ei suoraan pysty kirjoittamaan PINxn-kiikun arvoa, vaan se vaihtuu epäsuorasti seuraten PORTxn-kiikkua. Arvon yksi kirjoittaminen WPx-käskyllä vaihtaa ensin PORTxn-kiikun arvon vaihtaen pinnin lähdön tilaa. Kiikun muuttunut arvo näkyy pinnin ollessa lähtötilassa suoraan puskurin BUF0 kautta tai tulotilassa ylösvetovastuksen kautta, jos PUD ei ole ylhäällä. WPx-käskyä käytettäessä ei ole väliä, mitä dataväylällä on tarjolla, vaan PORTxn:n kiikun arvo invertoidaan aina, kun sitä käytetään. Atmega328P-mallissa ylimääräinen korvaava signaali PTOExn ja itse asiassa dataväylän looginen yksi tekee tismalleen saman tehden toisesta ohjaussignaalista turhan. Kombinaatiologiikka ohjaa kiikun kelloa, joten arvon tallettamiseen tarvitaan aina kaksi muuttuvaa arvoa olettaen, että tieto tallennetaan vain nousevalla reunalla.

WPx-käskyyn liittyvästä kombinaatiologiikasta löytyi eroja eri AVR-mallien välillä. Atmega32u4:llä WPx:ää käytettäessä on dataväylältä tuleva myös looginen yksi. Lisäksi tarjotaan PTOExn-käsky, jolla voidaan korvata WPx:n käyttö dataväylän loogisen ykkösen kanssa. PTOExn:n turhuuden takia Atmega328P:n kehittyneemmässä versiossa, 328PB:ssä, käsky onkin tiputettu pois. [4] Valmistajan teknisessä tiedotteessa (englanniksi datasheet) OR1 ja OR2 korvataan yhdellä AND-portilla, jos pinnissä ei ole ylimääräisiä ominaisuuksia. [2]

WRx kirjoittaa PORTxn-kiikkuun dataväylältä tarjottavan arvon vaihtaen ylösvetovastuksen tilan dataväylän bittia vastaavan tilaan. RRx-käsky sallii ohjattavan puskurin päästää PORTxn:n tila dataväylälle takaisinlukua varten.

Alin osio logiikkakaaviosta vastaa pinnin tilan lukemisesta (kuva 5). Ennen Schmitt-liipaisinta suoritetaan lepotilan ohjaaminen SLEEP-käskyllä. Käskyn ollessa looginen yksi siirtoportti katkaisee signaalin etenemisen ja n-tyypin MOSFET yhdistää Schmitt-liipaisimen tulon maihin. Lepotilan ohjauksen ollessa looginen nolla se ei vaikuta tulevaan signaaliin enempää kuin siirtoportin resistanssin verran.

Schmitt-liipaisimen tarkoituksena on vakauttaa mahdollista ykkösen ja nollan puolivälillä heiluvaa signaalia. Liipaisimen ominaisuuksiin kuuluu eri tasoilla olevat nousevan ja laskevan reunan kynnysjännitteet. Kahdella kiikulla synkronoidaan asynkroninen tulo synkroniseksi ja käyttökelpoiseksi tuloksi. Synkronoinnin tehtävä



Kuva 5. AVR:n pinnin lukemisen ohjaus (mukaillen lähdettä [2], Figure 14-5.)

on varmistaa se, että PINx-rekisteriin kirjoitetaan joko looginen yksi tai looginen nolla eikä mitään siltä väliltä. RPx-käskey antaa PINxn-rekisterin sisällön päästä dataväylälle. Analoginen tulosignaali otetaan pinnistä suoraan ADC:lle. Taulukossa 4 esitetään tavallisimmat ohjaussignaaliyhdistelmät ja niistä seuraavat I/O-pinnin tilat.

DDxn	PORTxn	PUD	I/O	Pinnin tila
0	0	X	Tulo	Korkea impedanssi
0	1	0	Tulo	Ylös veto käytössä, heikko 1
0	1	1	Tulo	Korkea impedanssi
1	0	X	Lähtö	Lähtö vahva 0
1	1	X	Lähtö	Lähtö vahva 1

Taulukko 4. AVR:n yleisimmät ohjaussignaaliyhdistelmät (mukaillen lähdettä [2], Table 14-1.)

### 3.2 MSP430-mikrokontrollerin I/O:n digitaalirakenne

MSP430-mikrokontrollereiden I/O-ratkaisuissa on paljon enemmän variaatiota mallien välillä, mutta suurin osa jakaa saman perusrakenteen, jonka ympärille on koottu lisätoiminnallisuuksia. Tämä osio käsittelee tarkemmin MSP430G2553-mikrokontrollerin P1.0-pinniä.

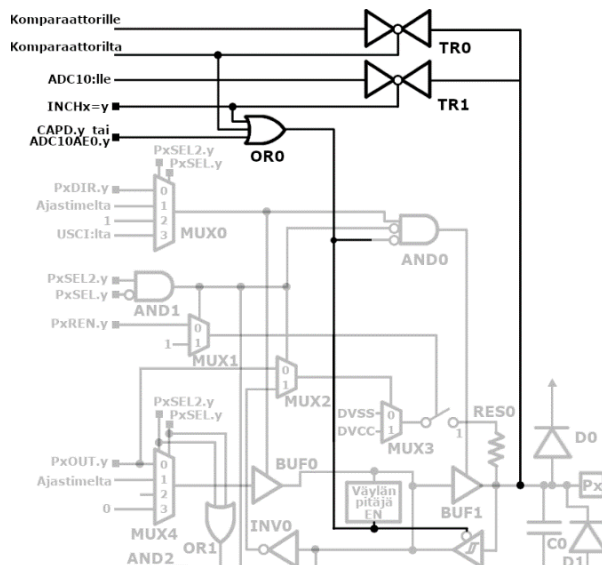
MSP430:ssä on samanlaiset suojadiodit kuin AVR:ssäkin. Diodit kestävät 2 milliampeerin virran, ja ne kytkeytyvät päälle, kun pinnin jännite kasvaa liian suureksi suhteessa käyttöjännitteeseen tai jos pinnin jännite on liian negatiivinen suhteessa maatasoon. Lyhytaikaisena jännitepiikkinä diodit kestävät jopa 1000 voltin piikin, joka voi syntyä esimerkiksi hankaussähköstä. MSP430:n pinnin kapasitanssi on puolet pienempi kuin AVR:ssä eli viisi pikofaradia. [5]

Toteutus on monimutkaisempi kuin AVR-kontrollerissa, joskin MSP430 tarjoaa kapasitiivisen havainnoinnin PWM-toiminnallisuuden sijasta. MSP430:n piirikaavio sisältää tarkat ohjaussignaali pinnin eri ominaisuuksille toisin kuin AVR:n tapauksessa, jossa lisäominaisuudet on esitetty vain multipleksereiden käytöllä (taulukko 5).

Rekisteri	Ominaisuudet
PxSEL	Ensimmäinen toimintatilanohjaussignaali
PxSEL2	Toinen toimintatilanohjaussignaali
PxREN	Ylösvetovastuksen ohjaus
PxDIR	Määrää pinnin suunnan (tulo vai lähtö)
PxIE	Keskeytysten käyttöönotto
PxIES	Keskeytyksen reunan valinta
PxIFG	Keskeytyksen lippu
PxOut	Pinnin lähtö
PxIN	Pinnin tulo
CAPD.y	Digitaalisen puskurin poiskytkeminen
ADC10AE0	ADC:n analoginen käyttöönotto
INCHx = y	Analogisen kanavan valinta ADC:lle
PxIRQ	Keskeytyssignaali

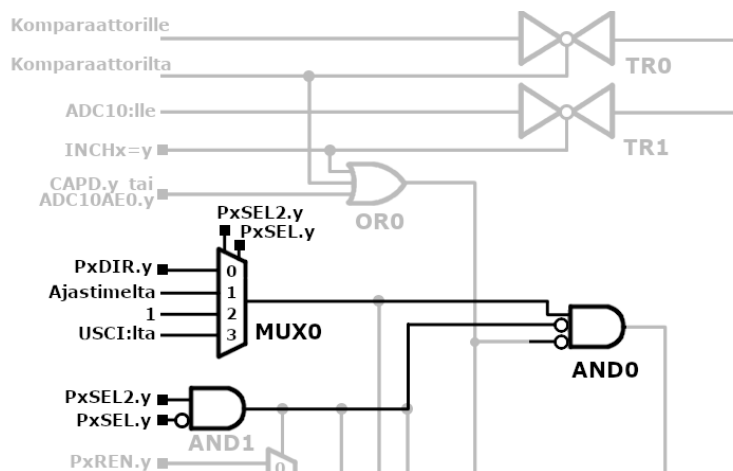
Taulukko 5. MSP430-kontrollerin ohjaussignaalit [6]

Ylin osio piirikaaviosta vastaa pinnin analogiaominaisuuksista ja digitaaliominaisuuksien poiskytkemisestä (kuva 6). Siirtoportti TR1 päästää pinnin signaalin ADC10:lle, jos ADC10:n tuloksi on määritetty kyseisen pinnin osoite ( $INCHx = y$ ). Siirtoportti TR0 puolestaan vie signaalin tarvittaessa komparaattorille. Digitaaliset ominaisuudet kytketään pois käytöstä, jos komparaattorilta tulee signaali, pinni on valittu ADC10:n tuloksi, pinni on määritelty valmiiksi toimimaan analogisena tulona tai kun digitaalinen puskuri on kytketty irti pinnistä. Kutsuttakoon tätä OR0:lta lähtevää signaalia analogiakytkimeksi.



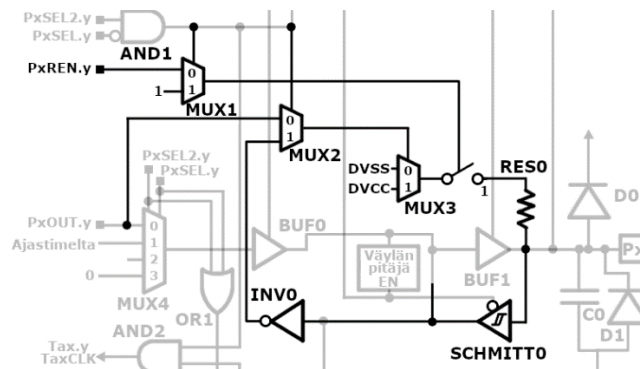
Kuva 6. MSP430:n analogiaosio (mukaillen lähdettä [6], Port P1 Pin Schematic: P1.0 to P1.2)

Toimintatilanohjaussignaalit PxSEL.y ja PxSEL2.y määrittävät yhdessä, käytetäänkö pinnin suunnan ohjaamisessa PxDIR.y-signaalia, annetaanko ohjaus ulkopuolisen moduulin käyttöön vai lukitaanko pinni lähdeksi (kuva 7). AND0 estää pinnin ohjauksen, jos analogiakytkin on yksi tai jos PxSEL on nolla ja PxSEL2 on yksi. Multiplexerissä MUX0 tämä vastaa tuloa, jossa on kiinteä looginen yksi. Tätä yhdistelmää käytetään kapasitiivisessa havaitsemisessa. [6]



Kuva 7. MSP430:n pinnin suunnan ohjaus (mukaillen lähdettä [6], Port P1 Pin Schematic: P1.0 to P1.2)

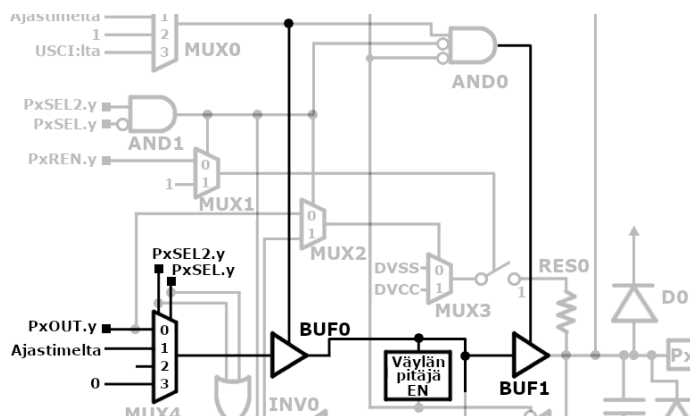
Multiplekseri MUX1 ottaa käyttöön ylösvetovastuksen kiinteästi, jos MUX0:n kiinteä yksi on valittu SEL- ja SEL2-signaaleilla (kuva 8). Muussa tapauksessa ylösvetoa ohjataan PxREN-signaalilla. MSP430:n tapauksessa ylösvedon lisäksi voidaan käyttää myös alasvetoa. Ylös- tai alasvetovastuksen suunta riippuu MUX2:n arvosta. Kapasitiivisessa havaitsemisessa MUX2 päästää portissa yksi olevan signaalin läpi. Kytkeä sisältää invertterin ja takaisinkytkennän, joista muodostuu oskilloiva piiri. Havaitsemisen ollessa päällä pinniin tulisi olla kytketty kondensaattori ja vastus, jolla pystytään hallitsemaan oskilloinnin taajuutta. Jos kapasitiivinen havainnointi ei ole päällä, vastuksen arvo on PxOUT-signaalin mukainen. Tulotilassa pinnin tulo ohjataan Schmitt-liipaisimen läpi, ellei analogiakytkin ole ylhäällä. Saatua signaali ohjataan PxIN-signaaliksi portin arvon lukua varten invertteriin, ulkoiselle moduulille tai keskeytyksen havaitisijalle.



Kuva 8. MSP430:n ylös- ja alasvedon ohjaus, kapasitiivisen havainnoinnin toteutus (mukaillen lähdettä [6], Port P1 Pin Schematic: P1.0 to P1.2)

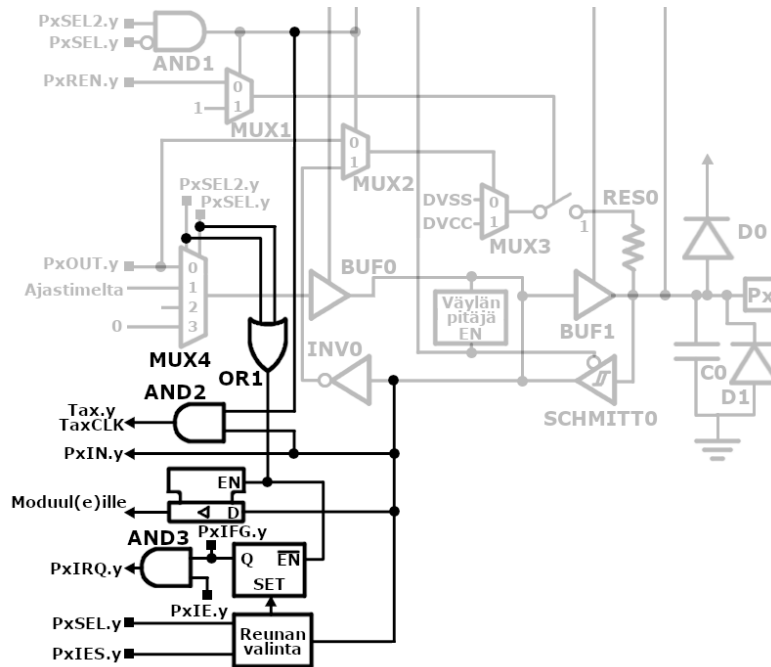
Jo tutut PxSEL- ja PxSEL-signaalit ohjaavat multiplekseriä MUX4, jonka lähtö ohjataan puskurista BUF0 eteenpäin, jos pinni on määritelty lähtötilaan (kuva 9). Signaalia ei kuitenkaan viedä pinnille asti ennen kuin on tarkistettu, ettei analogiakytkin ole ylhäällä tai kapasitiivinen havainnointi valittuna.

SCHMITT0:n ja BUF0:n lähdöt on kytketty toisiinsa. Tässä kohtaa nousee kysymys siitä, mitä tapahtuu, kun puskuri BUF0 päästää läpi, BUF1 on suljettu ja alasveto muuttaa Schmitt-liipaisimen tilaa. MUX4:n portti kaksi on kytkemätön, mikä jättää BUF0:n tulon kellumaan. BUF0:n lähtö voi siis olla kumpi tahansa arvo.



Kuva 9. MSP430:n pinnin arvon ohjaus (mukaillen lähdettä [6], Port P1 Pin Schematic: P1.0 to P1.2)

Ulkoisille moduuleille menevä data puskuroidaan silloin, kun PxOUT-signaali ei ole multiplekseissa valittuna (kuva 10). Keskeytykset tallentava kiikku otetaan käyttöön, kun PxOUT on käytössä. Kiikkuun tallennetaan tieto keskeytyksestä ajastimen ja USCI:n ollessa käytössä, mutta kiikun arvo viedään PxIRQ-väylään vasta, kun keskeytykset on otettu käyttöön PxIE-signaalilla. PxIFG-lippu nostetaan kuitenkin ilmoittamaan uudesta keskeytyksestä.



Kuva 10. MSP430:n tulon hallinta (mukaillen lähdettä [6], Port P1 Pin Schematic: P1.0 to P1.2)

Taulukossa 5 on esitetty yleisimmät ohjaussignaaliyhdistelmät samalla tavalla kuin aikaisemmin tekstissä AVR:n tapauksessa.

PxREN	PxOUT	PxDIR	I/O	Pinnin tila
1	0	0	Tulo	Alasveto käytössä
1	1	0	Tulo	Ylös veto käytössä
0	X	0	Tulo	Korkea impedanssi
0	0	1	Lähtö	Lähtö vahva 0
0	1	1	Lähtö	Lähtö vahva 1

Taulukko 5. MSP430:n yleisimmät ohjaussignaaliyhdistelmät, PxSEL ja PxSEL2 ovat arvoltaan nollia



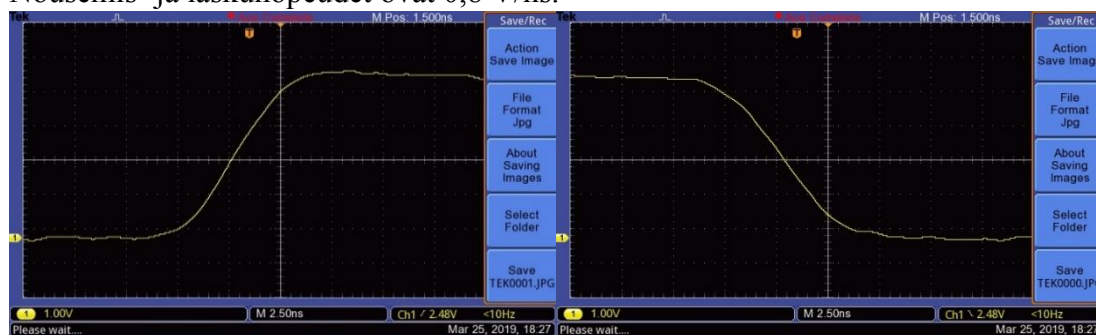
## 4 Mittaukset

### 4.1 AVR:n I/O:n nousu- ja laskuajat

Nopeaa toimintaa vaativissa sovelluksissa I/O-pinnin nousu- ja laskuajat voivat nousta merkittävään asemaan. Näin hitailla mikrokontrollereilla se ei tosin nousse ratkaisevaksi tekijäksi. Aikoja pystyy hallitsemaan ensisijaisesti säätämällä kuormavastusta.

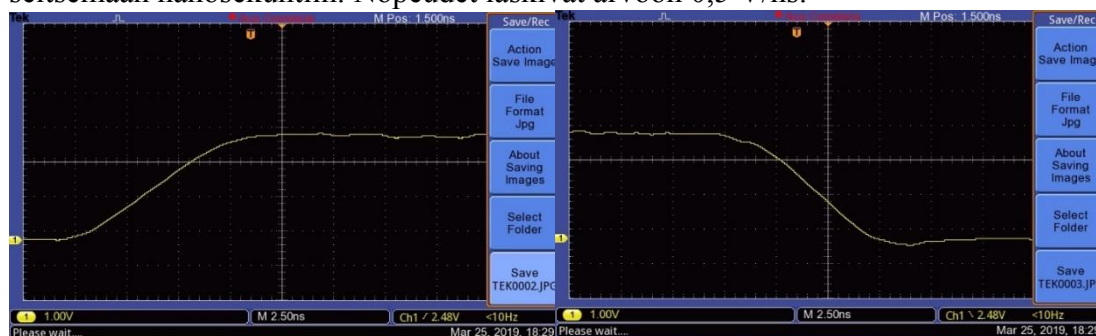
AVR:n nousu- ja laskuajat mitattiin Tektronix TBS 1202B-EDU -oskilloskoopilla ja Tektronixin 200 MHz:n 1:10-koettimella. Kuormaksi pinnille asetettiin 500 ohmin vastus maihin. 500 ohmia valikoitui arvoksi, sillä pidin sitä henkilökohtaisten kokemusteni kautta realistisena kuormituksena pinnille normaalissa käyttötilanteessa. Kontrolleri ohjelmoitiin vaihtamaan pinnin PB5 tilaa tietyin väliajoin mahdollistaen mittauksen. Mittaus ei ole erityisen tarkka, ja on vain yhdellä vastuksella kokeiltu, joten tuloksiin kannattaa suhtautua suuntaa-antavina. Testattu mikrokontrolleri oli mallia Atmega328P. Laskut ja tulkinnat tehtiin silmämääräisesti oskilloskoopin näytöltä.

5 voltin käyttöjännitteellä tila vaihtuu selvästi ja varsin symmetrisesti (kuvat 11a ja 11b). Aikaa vaihtumiseen kuluu noin viisi nanosekuntia kummassakin tapauksessa. Nousemis- ja laskunopeudet ovat 0,8 V/ns.



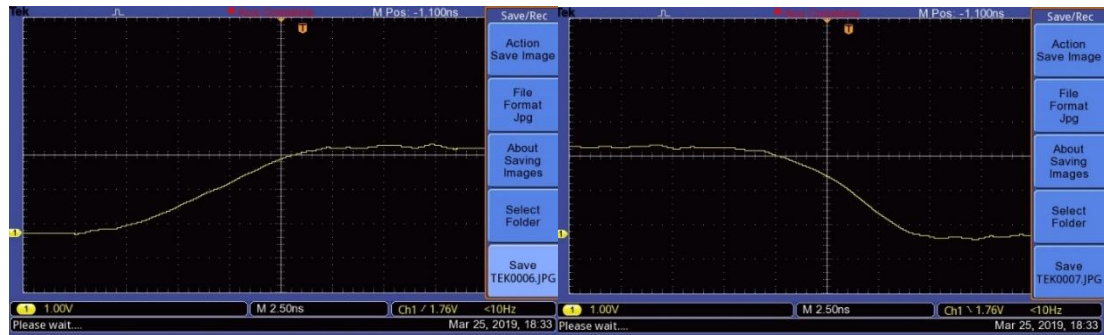
Kuvat 11a ja 11b. Atmega328P:n nousu- ja laskuajat,  $V_{cc} = 5\text{ V}$

3,3 voltilla symmetrisyys pysyy yhä hyvänä muutosnopeuksien heikentyessä (kuvat 12a ja 12b). Silmämääräisesti tarkasteltuna nousu- ja laskuajat kasvoivat noin seitsemään nanosekuntiin. Nopeudet laskivat arvoon 0,5 V/ns.



Kuvat 12a ja 12b. Atmega328P:n nousu- ja laskuajat,  $V_{cc} = 3,3\text{ V}$

2,7 voltilla tilanne ei muuttunut suuremmin suuntaan eikä toiseen muuten kuin nopeuksien laskuna (kuvat 13a ja 13b). Ajat pysyivät samana kuin 3,3 voltin tapauksessa, mutta nopeudet olivat enää luokkaa 0,3 V/ns.



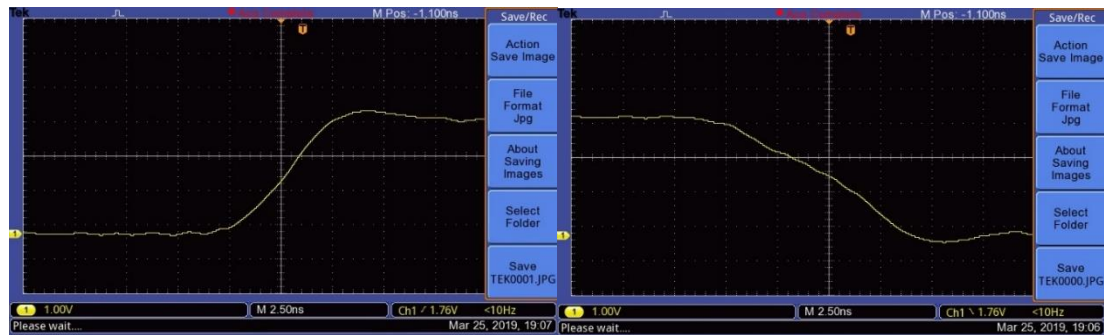
Kuvat 13a ja 13b. Atmega328P:n nousu- ja laskuajat,  $V_{cc} = 2,7 \text{ V}$

Kokonaisuudessaan Atmega328P:n kuvaajat eivät tarjonneet ihmeempiä yllätyksiä, sillä kuvaajat olivat symmetriset joka mittauksessa. Lisäksi nousu- ja laskuajat pysyivät lähellä vakiota, vaikka käyttöjännite muuttuikin.

#### 4.2 MSP430:n I/O:n nousu- ja laskuajat

MSP430:n nousu- ja laskukäyriä tutkittiin tarkalleen samoilla metodeilla kuin AVR:kin kanssa. Käyttöjännitteet olivat tosin astetta matalammat ollessa välillä 1,8 V – 3,6 V. Tutkittava malli oli MSP430G2452 ja mitattu pinni P1.3.

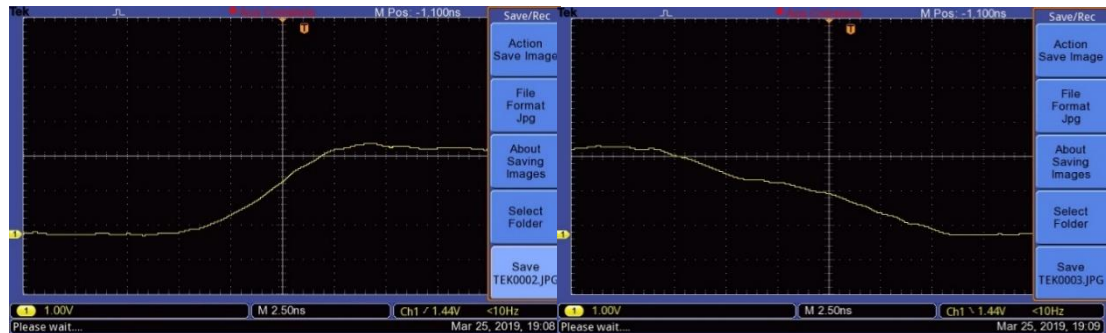
3,6 voltin jännitteellä nousukäyrä oli selvästi jyrkempi kuin laskussa, mikä oli selvä eroavaisuus AVR:ään verrattuna (kuvat 14a ja 14b). Nousu kesti 4,5 nanosekuntia ja lasku noin 8 nanosekuntia. Graafin muutososuudet vastaavat noin 3 voltin muutosta, joten nousunopeus on  $3/(4,5) \text{ V/ns} = 0,67 \text{ V/ns}$  ja laskunopeus  $0,38 \text{ V/ns}$ .



Kuvat 14a ja 14b. MSP430:n nousu- ja laskuajat,  $V_{cc} = 3,6 \text{ V}$

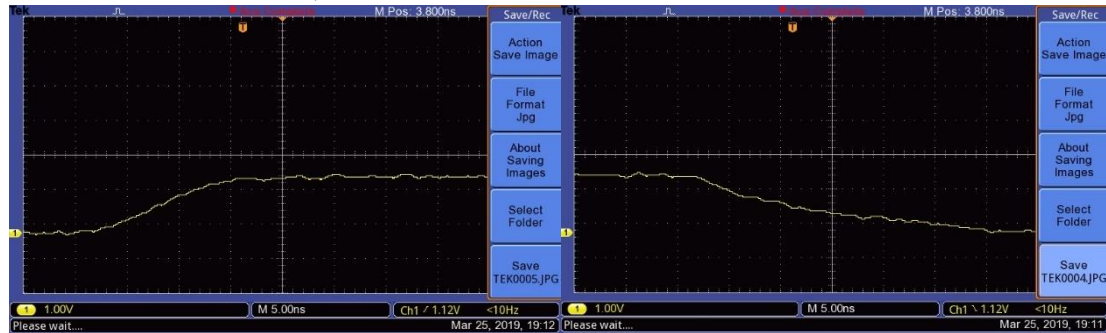
2,7 voltilla laskuaika piteni todella merkittävästi nousuajan pysyessä samana kuin aikaisemmin (kuvat 15a ja 15b). Lasku kesti melkein 12,5 nanosekuntia ja nousu noin 5 nanosekuntia. Jännitteen muutos tällä aikavälillä oli kaksi voltia. Tästä voidaan

laskea nousunopeudeksi  $2/5 \text{ V/ns} = 0,4 \text{ V/ns}$  ja laskunopeudeksi  $2/12,5 \text{ V/ns} = 0,16 \text{ V/ns}$ .



Kuvat 15a ja 15b. MSP430:n nousu- ja laskuajat,  $V_{cc} = 2,7 \text{ V}$

Sama kehitys jatkuu 1,8 voltilla (kuvat 16a ja 16b). Aikaskaalaa jouduttiin muuttamaan laskuajan pidentyessä entisestään. Nousuaika oli 10 nanosekuntia ja laskuaika merkittävän suuri 25 nanosekuntia. Laskureunan loppua oli vaikeaa enää erottaa tasoittuneesta loogisesta nolasta. Nousunopeus oli  $1/10 \text{ V/ns} = 0,1 \text{ V/ns}$  ja laskuaika  $1/25 \text{ V/ns} = 0,04 \text{ V/ns}$ .



Kuvat 16a ja 16b. MSP430:n nousu- ja laskuajat,  $V_{cc} = 1,8 \text{ V}$

Verrattuna Atmegän tuloksiin laskuaika ja sen reagoiminen muuttuvaan käyttöjännitteeseen olivat täysin erilaisia. Huomioiden mittauksen alemman jännitealueen ero on silti suuri. Käyttöjännitteen pudottaminen hidasti laskua venyttäen laskuajan melkein kymmenkertaiseksi verrattuna 3,6 voltin käyttöjännitteellä tehtyihin testeihin.

Nousuaika oli vähemmän immuuni käyttöjännitteen muutokselle, mutta sekään ei ollut yhtä immuuni kuin AVR:n vastaava. Tässä tapauksessa alempi mittauksissa käytetty käyttöjännitealue voi vaikuttaa muutoksen verran.

#### 4.3 AVR:n I/O:n resistanssimittaukset

AVR-mikrokontrollerin virtamittaukset tehtiin Atmega328P-kontrolleriin perustuvalla Arduino Uno-kehitysalustalla. Lisäksi avonielulähtöä tutkittiin Atmega32u4-kontrolleriin perustuvasta Arduino Leonardo -kehitysalustasta. Pinni kahdeksan oli ohjelmoitu avonielulähdöksi ja pinni yhdeksän lähdöksi ylös vetovastuksella. Mittaukset suoritettiin Fluke 175 -yleismittarilla, ja teholahteenä toimi Teklab TLP305. Kaikki mittaukset tehtiin huoneenlämmössä. Mikrokontrolleri

ohjelmoitiin Arduino IDE-kehitysympäristöllä ja siihen ajettiin 8 MHz:n käynnistyslataaja 2,7 voltin testejä varten.

Mittaukset aloitettiin selvittämällä ylösvetovastuksen suuruus eri käyttöjännitteillä. Vastus on kiinteä, eikä sen arvo riipu käyttöjännitteestä, joten arvo oli lähellä vakiota. Ylösvetoon käytettävä PMOS voi periaatteessa vaikuttaa tulokseen, sillä sen vaste ei ole lineaarinen käyttöjännitteen suhteen, mutta sen merkitys on pieni suhteessa noin 36 kΩ:n vastukseen. Koekytkentä toteutettiin yleismittarin jännitemittarilla kytkemällä pinniin 100500 ohmin vastus ja mittaamalla sen yli oleva jännite. Virran ja pinnin yli olevan jännitehäviön ollessa selvillä pystyttiin selvittämään ylösvetovastuksen resistanssi. Käyttöjännitettä syötettiin suoraan kehitysalustan 5V-pinniin ja jännitealue oli 2,7 V – 5,0 V.

Atmega328P			
Käyttöjännite (V)	Ylösveto, virta (A)	Jännite 100500 Ω:n vastuksen yli (V)	Ylösvetovastus (Ω)
3,3	2,42289E-05	2,435	35701,23203
4	2,92935E-05	2,944	36048,91304
5	3,63682E-05	3,655	36982,90014

Taulukko 6. Atmega328P:n ylösvetovastuksen ominaisuudet

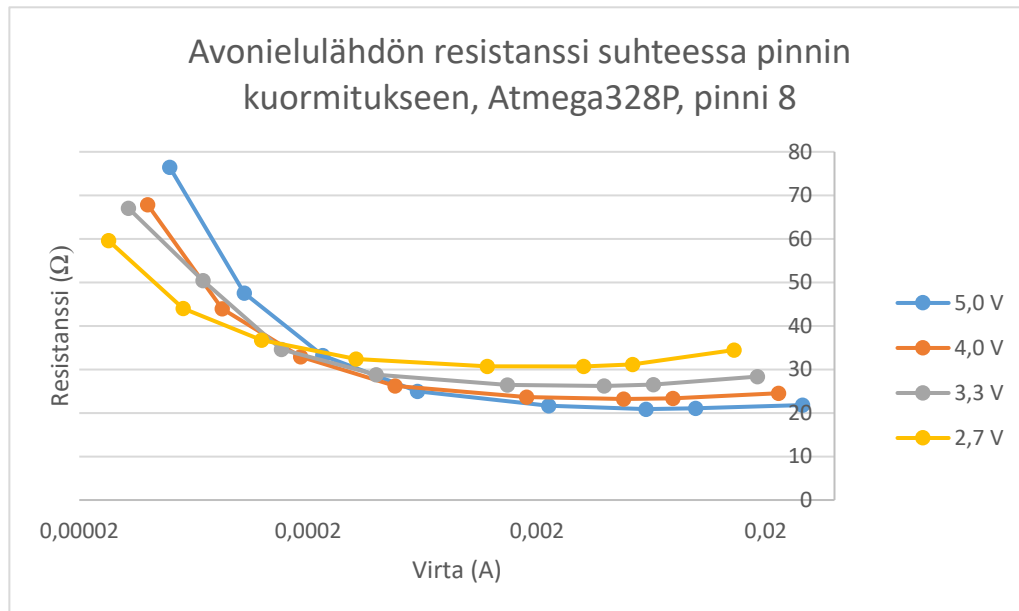
Toinen tutkimuksen keskeisistä päämääristä oli saada selville avonielulähtöjen muodostamat resistanssit suhteessa maahan. Mittaus tehtiin vastuksilla ja yleismittarin jännitemittauksella. Käyttöjännitettä syötettiin 5V-pinnin kautta teholahteesta. Avonieluksi asetettu pinni kytkettiin samaan käyttöjännitteeseen erikokoisilla vastuksilla ja mitattiin pinnin jännite. Ideaalitulanteessa jännite olisi nollapotentialissa, mutta MOSFET ja siirtoportti aiheuttavat pienen jännitepudotuksen. Näiden yhteinen resistanssi vastustaa virran kulkua, mutta sen arvo vaihtelee hieman käyttöjännitteen funktiona.

Virran suuruus saadaan tietää yhtälön

$$U = RI \Rightarrow I = \frac{U}{R} \quad (2)$$

mukaisesti. Avonielun resistanssi voidaan laskea tunnetun virran ja pinnin jännitteen avulla saman yhtälön mukaisesti.

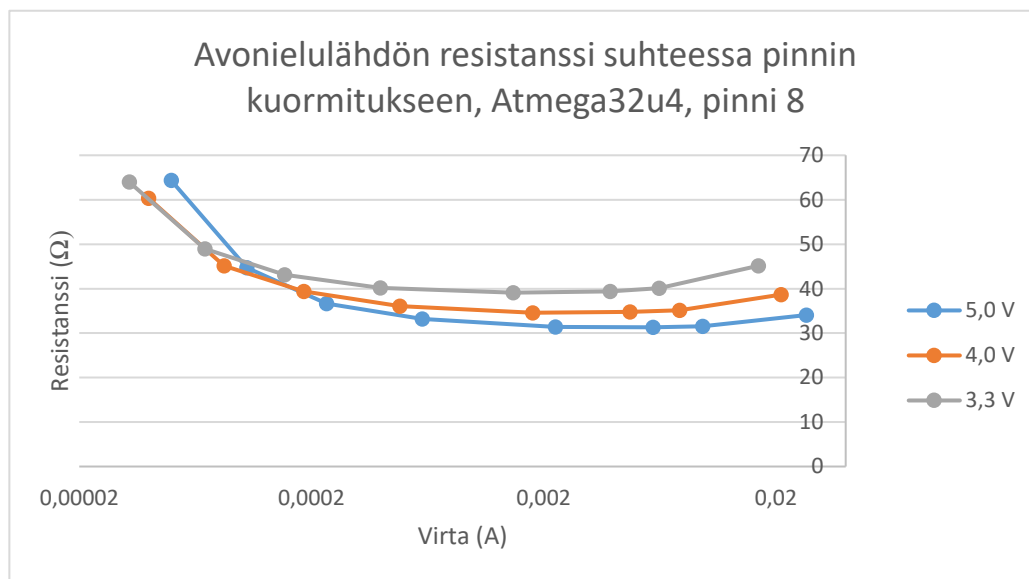
Kuvasta 17 huomataan, että kuormituksella ja käyttöjännitteellä on kummallakin vaikutusta resistanssiin. Varsinkin pienellä kuormituksella on suuri vaikutus. Huomionarvoista on, että suurella käyttöjännitteellä ja pienellä kuormituksella resistanssi on suurempi kuin pienemmällä käyttöjännitteellä mitattaessa. Suurella käyttöjännitteellä avonielulähtö vastustaa suhteessa sitä vähemmän, mitä suurempi kuormitus on.



Kuva 17. Atmega328P:n avonielulähdön resistanssi

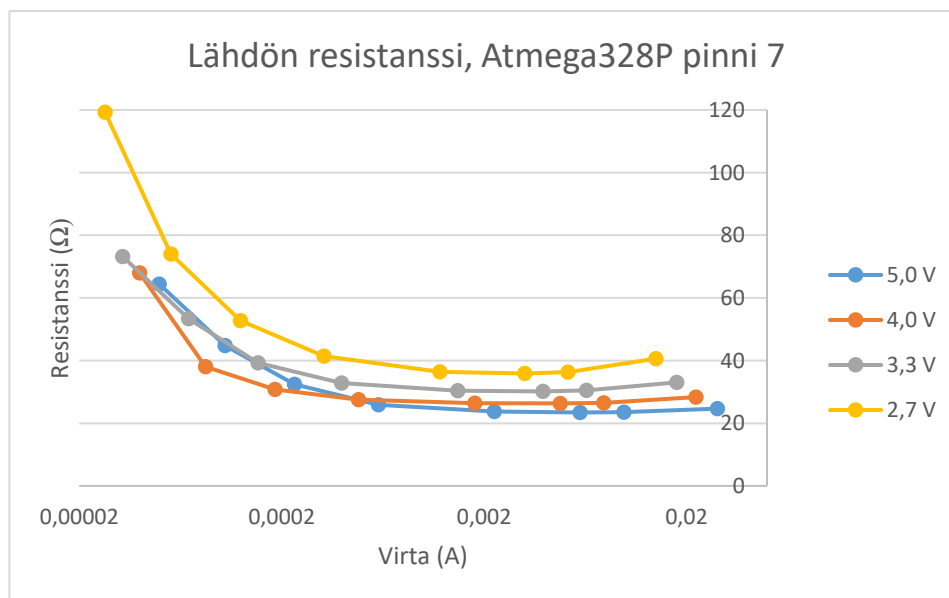
Mittaukset toistettiin alkuperäisestä suunnitelmasta poiketen myös harvemmin käytetyllä Atmega32u4-kontrollerilla (kuva 18). Pieniä eroja mallien välillä oli odotettavissa, mutta ero oli silti yllättävän suuri ottaen huomioon kummankin mallin digitaalisen I/O-rakenteen samanlaisuuden. 32u4-kontrolleri on mahdollisesti valmistettu eri aikaan ja kehittymättömämmällä prosessilla.

Kuvaajien muodot olivat samankaltaisia, joskin Atmega328P:n tapauksessa käyttöjännitteellä oli vähemmän merkitystä, ja resistanssi oli melkein 10 ohmia pienempi. Tämä on kuitenkin linjassa valmistajan teknisten tiedotteiden kanssa. Asteikko muutettiin logaritmiseksi, jotta saadaan mahdolliset vaihtelut paremmin näkyviin. Lineaariasteikolla resistanssin muutos oli likipitään suora yli 4 milliampeerin virralla. Pienellä kuormalla resistanssi on suurempi kuin valmistajan ilmoittama, josta osa, muttei kaikki, selittynee mittalaitteen epätarkkuudella ja häviöinä johtimissa.



Kuva 18. Atmega32u4:n avonielulähdön resistanssi

Kolmantena lähtöä mitattiin muuten samalla tekniikalla kuin avonielulähtöäkin, mutta pinnin arvoksi oli määritetty looginen yksi, ja se johdettiin vastuksen kautta maihin mitaten samalla pinnin jännitettä verrattuna käyttöjännitteeseen (kuva 19). Tulokset olivat samansuuntaisia kuin avonielunkin mittauksissa, eli resistanssi kasvaa merkittävästi alle 0,2 milliampeerin virroilla, ja sitä suuremmilla virroilla se pysyy varsin tasaisena.



Kuva 19. Atmega328P:n lähdön resistanssi tilassa vahva looginen yksi

Atmegan resistanssit olivat hyvin linjassa valmistajan ilmoittamien jännite – virta-käyrien kanssa normaalilla käyttöalueella. Hyvin alhaisilla virroilla resistanssi kasvaa voimakkaasti, mikä erosi valmistajan kuvaajista. On toki huomioitava kuvaajien erilainen luonne, sillä valmistajan kuvaajat ovat lineaarisia. Atmega32u4:n mittaukset

paljastivat, että AVR-tuoteperheessä voi olla eroavaisuuksia pinnien käytöksessä. Erot voivat johtua erilaisesta valmistusprosessista ja paketoinnin eroista.

#### 4.4 MSP430:n I/O:n resistanssimittaukset

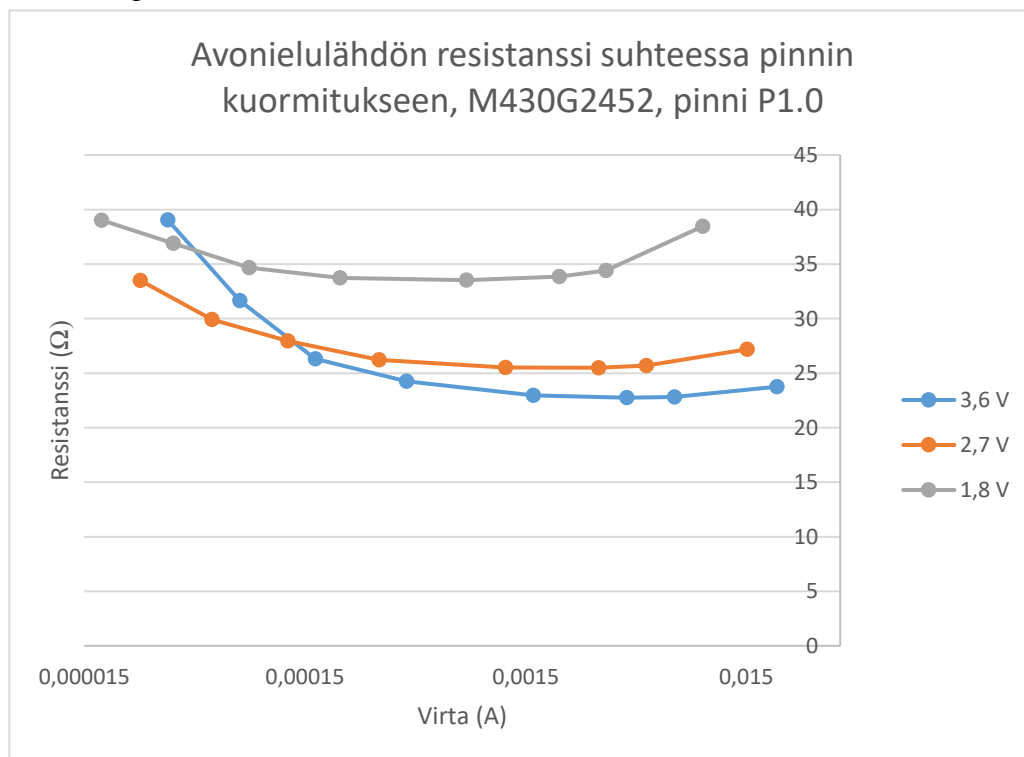
Texas Instrumentsilta mittauksissa oli mukana Launchpad MSP-EXP430G2:n mukana tullut MSP430G2542-malli. Mittauksissa käytettiin ainoastaan valmistajan ilmoittamia käyttöjännitteitä alueella 1,8 V – 3,6 V. Mittauslaitteisto ja -menetelmät olivat vastuksia myöten samat kuin AVR:nkin tapauksessa. Käyttöjännitettä syötettiin kehitysalustan VCC-pinniin. Mikrokontrolleri ohjelmoitiin Arduino IDE-ohjelmistoon perustuvalla Energia IDE -kehitysympäristöllä.

Ylösvetovastus oli MSP430-kontrollerissa muutaman kilo-ohmin verran suurempi kuin AVR-kontrollerin vastaava. Mittaukset eivät muuten tarjonneet tältä osin suurempia yllätyksiä (taulukko 7).

M430G2452			
Käyttöjännite (V)	Ylös veto, virta (A)	Jännite 100500 $\Omega$ :n vastuksen yli (V)	Ylös vetovastus ( $\Omega$ )
1,8	1,28856E-05	1,295	39191,11969
2,7	1,93532E-05	1,945	39011,56812
3,6	2,56915E-05	2,582	39623,93493

Taulukko 7. MSP430G2452:n ylösvedon ominaisuudet

Avonielulähtö toimi jonkin verran lineaarisemmin kuin kumpikaan mitatuista AVR-kontrollereista (kuva 20). Toisaalta käyttöjännite vaikuttaa tuloksiin enemmän kuin AVR:n tapauksessa.



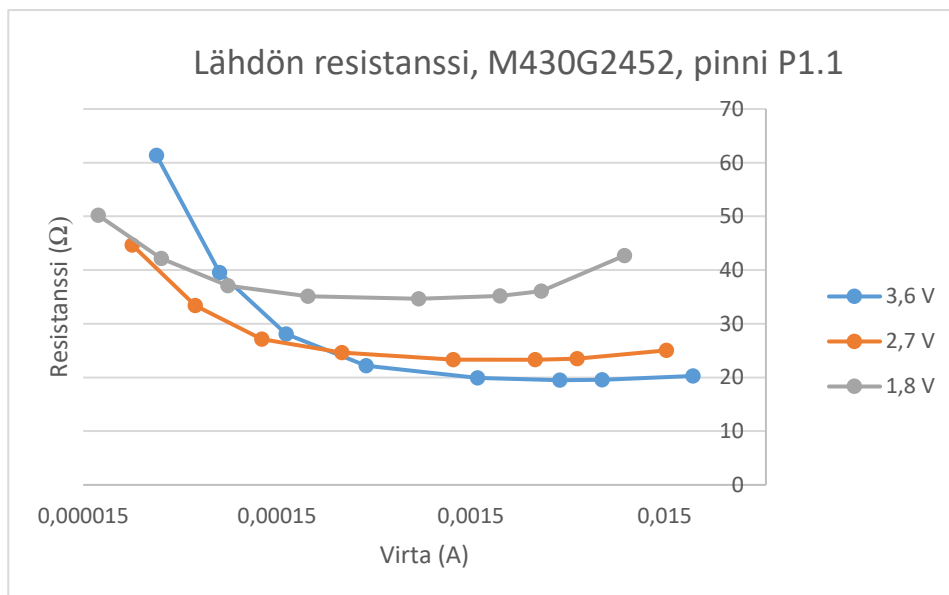
Kuva 20. MSP430G2452:n avonielulähdön resistanssi



1,8 ja 2,7 voltilla avonielulähtö toimi samankaltaisesti, sillä niiden graafit ovat hyvin samanmuotoiset. 1,8 voltilla resistanssi kasvaa jonkin verran ollessa melkein 10  $\Omega$ :a korkeampi kuin 2,7 voltilla. Kuormitus vaikutti alhaisilla käyttöjännitteillä suurimmillaan noin 5  $\Omega$ :n verran.

3,6 voltin käyttöjännitteellä ja pienellä kuormalla käyttäytyminen sen sijaan muuttuu. Noin sadalla mikroampeerilla resistanssi on korkeampi kuin kummallakaan alemmista käyttöjännitteistä. Erotus pienimmän ja suurimman resistanssin välillä on melkein 20  $\Omega$ :a käytetyllä mitta-alueella. Suuremmalla kuormalla vastaavuus kuvaajien välillä paranee.

Sama käytös toistuu käytettäessä porttia loogisena ykkösenä (kuva 21). Käyttäytyminen kummassakin käytössä on melkein hämmästyttävän yhtenevää, mikä osoittaa sen, että Texas Instruments on onnistunut tasapainottamaan CMOS-teknologiansa paremmin kuin AVR-kontrollereita valmistava Microchip. Ainoa suurempi eroavaisuus kahden käyttötilan välillä on lähdön entistä suurempi resistanssi 3,6 voltilla ja pienellä kuormalla.



Kuva 21. MSP430G2452:n lähdön resistanssi tilassa vahva looginen yksi

Myös MSP430:n resistanssi oli karkeasti samassa suuruusluokassa valmistajan ilmoittaman kanssa. Mitatut resistanssit olivat itse asiassa jonkin verran matalammat kuin mitä valmistajan virta – jännite-kuvaajasta voi päätellä. Valmistaja ilmoittaa pinnin käyttäytymisen jopa 45 milliampeeriin asti, joten tämän tutkimuksen mittauksia olisi voinut huoletta jatkaa pidemmällekin. [7]



## 5. Pohdinta

Tutkimus onnistui hyvin ja vastasi sille asetettuja tavoitteita. Suuriin kysymyksiin löytyi vastaukset, mutta MSP430:n kohdalla jäi hieman epäselvyyttä kelluvan multiplekserin tulon kanssa.

Mittaukset niin ikään sujuivat ongelmitta, tosin välillä vapaasti pöydällä lojuneiden mittauskohteiden mittaaminen oli haastavaa, ja jonkinasteinen testipenkki ei olisi ollut pahitteeksi. Järjestelmällisempi tutkimustapa olisi myös säästänyt jonkin verran ylimääräiseltä työltä.

Resistanssimittauksissa olisi voinut päästä vähemmällä hyödyntämällä yleismittarin resistanssinmittausominaisuutta. Nousu- ja laskuaikamittausten kanssa käytettiin vain yhtä kuormavastusta aikataulurajoitusten vuoksi. Tämä mahdollistaa paljon laajemmankin tutkimuksen aiheesta.

Tutkimuksen oli tarkoitus kattaa koko MSP430- ja AVR-mallisto, mikä olisi mallien lukumäärän huomioiden melkoinen ponnistus. Valikoidut mallit MSP430G2553 ja Atmega328P osoittautuivat lopulta oivallisiksi tutkimuskohteiksi kummankin edustaessa oletettavaa keskiluokkaa ominaisuuksiltaan. Kehitysalustat ja Arduino IDE-pohjaiset ohjelmointiympäristöt helpottivat käsittelyä ja ohjelmointia huomattavasti. Mittauksissa käytettiin MSP430G2553:n tilalla G2452-mallia, koska G2553-mallia ei saatu pysymään vakaana 1,8 voltilla syystä, joka jäi tuntemattomaksi. Atmegan tapauksessa yritettiin löytää Atmega328P-mallia Microchipin tarjoamista ibis-tiedostoista tuloksetta. Suurin osa ibis-tiedostoista oli muutenkin päivitetty ennen vuotta 2010, joten ne eivät olisi välttämättä vastanneet enää nykypäivän mikrokontrollereita ja uusia prosesseja/paketointeja. MSP430:stä ei löydetty ibis-tiedostoja lainkaan.

Tutkimuksessa saatu tieto ei välttämättä rajoitu ainoastaan tutkittuihin malleihin, vaan hyötyä saattaa olla jopa enemmän nopeammille piireille, joiden kanssa pinnien tai porttien käyttäytymisen tietäminen on välttämätöntä. Työstä jäi joka tapauksessa tekijälle hyvä maku ja kosolti tietotaitoa taskun pohjalle.

## 6. Yhteenveto

Samankaltaisesta käyttötarkoituksesta huolimatta AVR- ja MSP430-mikrokontrollereiden rakenteet olivat erilaisia muutamia samankaltaisuuksia lukuun ottamatta. Kummatkin kontrollerit tarjosivat kuitenkin hyvin lähelle samat ominaisuudet.

Mittaukset selvensivät hyvin I/O-porttien käyttäytymistä. Atmega328P selvisi nousu- ja laskuajan tutkimuksesta ilman yllätyksiä ja ennustettavasti. Pitää kuitenkin muistaa, ettei sitä testattu alhaisella 1,8 voltin käyttöjännitteellä. MSP430G2452 puolestaan yllätti hyvin käyttöjännitteelle herkällä laskuajallansa.

Virta – resistanssi-mittaukset osoittivat kummankin mikrokontrollerin olevan samassa suuruusluokassa portin resistanssien suhteen. MSP430 todettiin olevan tässäkin herkempi käyttöjännitteen muutokselle, mutta toisaalta resistanssit olivat matalampia kuin kummassakaan AVR:ssä. Atmega32u4-kontrollerissa oli kaikista korkein resistanssi, mikä yllätti. Microchipin (ennen Atmel) prosesseissa on siis oltava eroja mallien kesken tai prosessi on muuttunut näiden kahden kontrollerin valmistuksen välillä.

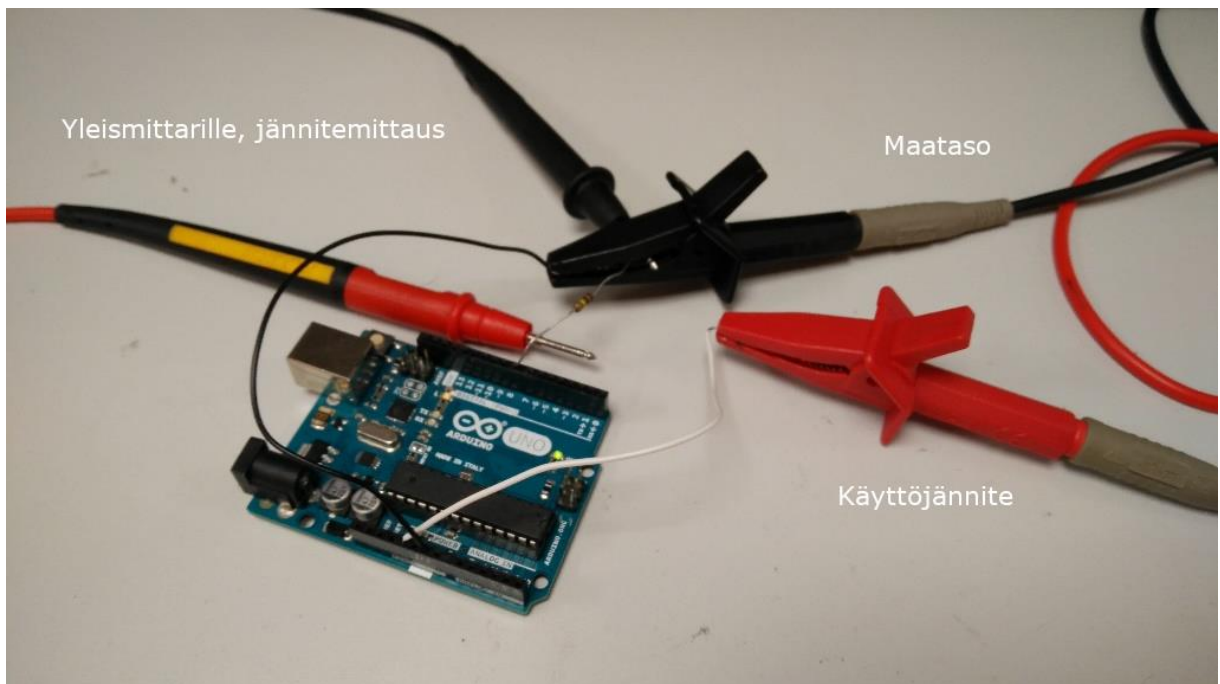
## 7. Lähteet

- [1] Davies, J. H., (2008) MSP430 microcontroller basics, Newnes
- [2] Atmega328P Datasheet (luettu 21.3.2019), Microchip Technology Inc. (Atmel Corporation), URL: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/ATmega48A-PA-88A-PA-168A-PA-328-P-DS-DS40002061A.pdf>
- [3] Atmega2560 Datasheet (luettu 10.3.2019), Microchip Technology Inc. (Atmel Corporation), URL: [http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-2549-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega640-1280-1281-2560-2561\\_datasheet.pdf](http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-2549-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega640-1280-1281-2560-2561_datasheet.pdf)
- [4] Atmega328PB Datasheet (luettu 9.4.2019), Microchip Technology Inc. (Atmel Corporation), URL: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/ATmega48A-PA-88A-PA-168A-PA-328-P-DS-DS40002061A.pdf>
- [5] ESD Diode Current Specification (luettu 24.3.2019), Texas Instruments, URL: <http://www.ti.com/lit/an/slaa689/slaa689.pdf>
- [6] MSP430G2553 Datasheet (luettu 26.3.2019), Texas Instruments Incorporated, URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/msp430g2553.pdf>
- [7] MSP430G2452 Datasheet (luettu 28.3.2019), Texas Instruments Incorporated, URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/msp430g2452.pdf>

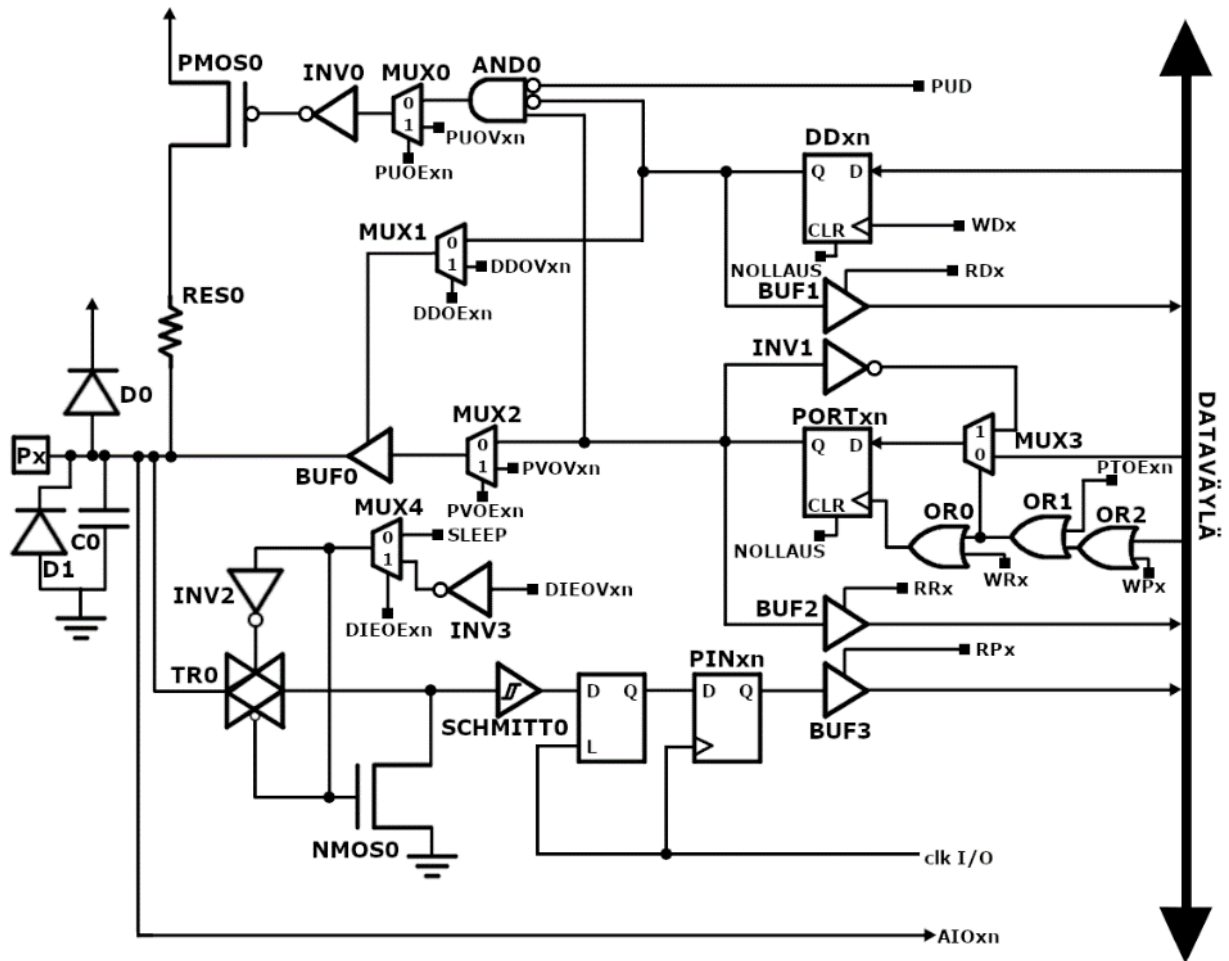
## 8. Liitteet

Liite 1	Kehitysalustat ja digitaalisen lähdön (looginen 1) mittausjärjestelyt
Liite 2	Atmega328P:n digitaalirakenne kokonaisuudessaan
Liite 3	MSP430:n digitaalirakenne kokonaisuudessaan
Liite 4	Arduino IDE:n koodi Arduinolle, Energia IDE:n koodi Launchpadille

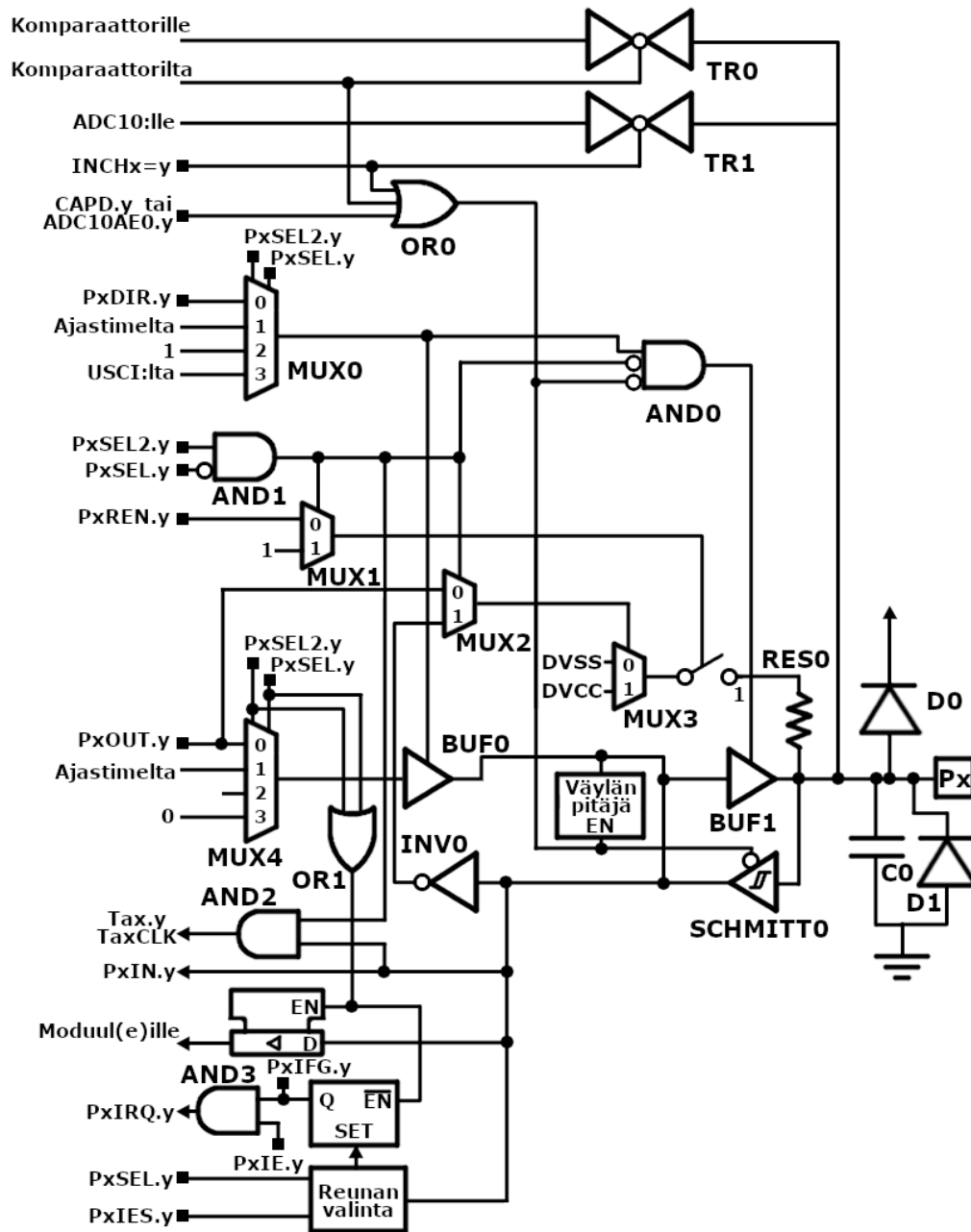
## Liite 1



Liite 2



## Liite 3



## Liite 4

```
// Arduino IDE
```

```
void setup() {  
  DDRB = B00010001;  
  PORTB = B11111110;  
  DDRC = B10000000;  
  DDRD = B10000000;  
  PORTD = B10000000;  
}  
void loop() {  
  while(1){  
    // PORTB = B00010000; //nousu- ja laskuajan mittauksissa pois kommenteista  
    delay(1000);  
    // PORTB = B00000000; //nousu- ja laskuajan mittauksissa pois kommenteista  
    delay(1000);  
  }  
}
```

```
//Energia IDE
```

```
void setup() {  
  pinMode(P1_0, OUTPUT);  
  pinMode(P1_1, OUTPUT);  
  pinMode(P1_2, INPUT);  
  pinMode(P1_3, OUTPUT);  
  //pinMode(P1_3, INPUT_PULLUP); ylösvedon mittauksissa  
  digitalWrite(P1_0, LOW);  
  digitalWrite(P1_1, HIGH);  
}  
  
void loop() {  
  digitalWrite(P1_3, LOW); //pois käytöstä ylösvedon mittauksissa  
  delay(1000);  
  digitalWrite(P1_3, HIGH); //pois käytöstä ylösvedon mittauksissa  
  delay(1000);  
}
```